

냉각된 원전 2차계통수의 온도측정을 위한 비접촉식 광섬유 온도센서의 개발

유욱재¹, 이봉수¹, 박병기², 조영호^{3*}

¹건국대학교 의학공학부, ²순천향대학교 에너지환경공학과, ³대구가톨릭대학교 방사선학과

Development of a Fiber-optic Noncontact Temperature Sensor for Measuring the Temperature of Cooled Secondary Water in a Nuclear Power Plant

Wook Jae Yoo¹, Bongsoo Lee¹, Byung Gi Park² and Young-Ho Cho^{3*}

¹School of Biomedical Engineering, Konkuk University

²Department of Energy & Environmental Engineering, Soonchunhyang University

³Department of Radiological Science, Catholic University of Daegu

요 약 원전 2차계통수의 pH를 예측을 위해서는 샘플을 채취, 냉각시킨 후 pH를 측정하게 되는데 이 때 샘플의 온도는 pH를 변화시키는 중요한 요인이 된다. 본 연구에서는 할로겐화 은 광섬유를 이용하여 비접촉식 온도센서를 개발하였고, 열전쌍열을 이용하여 열원으로부터 방출되는 적외선을 측정하였다. 열원과 광섬유 끝단 사이의 거리 및 각도 변화에 따른 광섬유 온도센서의 출력신호를 분석하였으며, 광섬유 온도센서로 측정할 온도범위는 25-60℃이다. 본 연구결과를 기초로 원전 2차계통수 pH 샘플의 온도를 측정하기 위해 할로겐화 은 광섬유를 이용한 비접촉식 온도센서의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

Abstract Generally, a pH value of secondary water in a nuclear power plant should be estimated after sampling and cooling down. In this process, the measurement of temperature is very important because a pH value is varied according to the temperature of secondary water. In this study, a noncontact fiber-optic temperature sensor using a silver halide optical fiber is fabricated to measure the temperature of cooled secondary water. And we have measured an infrared radiation, which is transferred by a silver halide optical fiber from a heat source, using a thermopile sensor. The relationships between the temperature of a heat source and the output voltage of the fiber-optic temperature sensor according to the change of distance and angle are determined. The measurable temperature range of the fiber-optic temperature sensor is from 25 to 60℃. Based on the results of this study, a noncontact temperature sensor using a silver halide optical fiber can be developed for the temperature measurement of the pH sample in the secondary water system.

Key Words : Fiber-Optic Sensor, Infrared Radiation, Noncontact Temperature Sensor, Secondary Water, Silver Halide Optical Fiber

1. 서론

원자력발전소(원전)에서는 증기발생기 및 2차계통

(secondary system) 기기, 배관들의 구조적 건전성을 유지하고 안전운전 및 설비의 수명연장을 위해 2차계통수 (secondary water)의 pH, 부식전위 및 불순물 농도를 적정

"이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(원자력연구개발사업 고유강점기술육성분야, M20806000154-08M0600-15410)."

*교신저자 : 조영호(cyhid@hanmail.net)

접수일 10년 01월 19일

수정일 (1차 10년 03월 23일, 2차 10년 04월 29일)

계재확정일 10년 05월 13일

수준에서 관리하고 있다. 특히 pH 관리를 위하여 전취발 성처리법(all volatile treatment, AVT)이 도입되어 사용되고 있으며, pH 제어제의 성능이 유지되고 있는지 확인하기 위하여 주기적으로 시료를 채취하여 상온에서 pH를 측정, 확인하고 있다. 원전 2차계통 수질관리 인자들의 온라인 측정을 통하여 계통의 운전을 더욱 정확하게 예측하기 위한 수질관리 변수로 고온 pH 측정의 중요성은 잘 알려져 있으나 현재까지 300℃ 이상의 고온/고압 환경에서 사용가능한 고온 pH 센서가 개발되지 않고 있다. 그러므로 현재 사용되고 있는 대부분의 pH 측정기술은 저온 pH를 측정하여 고온 pH를 예측하는 방법을 사용하고 있다[1-3].

원전 2차계통에서는 pH 제어제로 암모니아 또는 아민(amine) 계열의 화학물질과 더불어 부식전위 제어를 위하여 하이드라진(hydrazine)이 첨가된 복잡한 수화학(water chemistry) 물질을 사용하며, 저온 pH를 고온 pH로 변환하기 위하여 MULTEQ와 같은 컴퓨터 코드를 사용한다. 하지만 pH의 경우, 온도에 따라 측정값이 바뀌므로 저온으로 냉각된 pH 샘플의 정확한 온도측정이 선행되어야 한다. 현재, 온도측정을 위해 삽입성 및 내구성이 뛰어난 열전쌍(thermocouple)이 사용되고 있지만 전자기장에 영향을 받으며, 2차계통 기기 및 배관 내에서 온도 감지부(sensing probe)가 부식이 된다는 단점을 가진다.

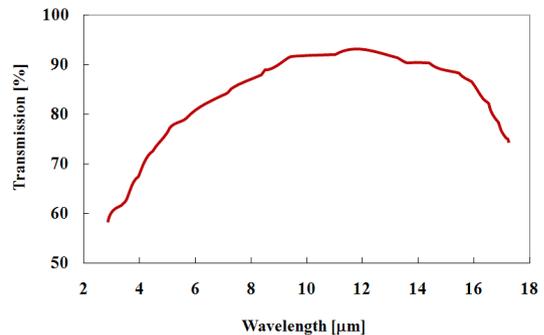
광섬유(optical fiber)를 이용한 온도센서는 크게 광섬유와 광 검출기로 나뉘고 외부의 온도변화에 따른 광 신호의 특성변화를 측정한다[4]. 감지부와 광 신호 전송부(light guide)의 역할을 동시에 수행하는 광섬유는 크기가 작고 유연하며, 재질의 특성상 부식이 되지 않고 무독성이다. 또한 신호의 장거리 전달능력을 가지며 전자기장의 영향을 받지 않는다[5-7]. 그러므로 광섬유 온도센서는 일반 전자식 온도센서를 사용하지 못하는 환경(harsh environment)에서도 온도를 측정할 수 있다.

특히 적외선 투과 광섬유(infrared optical fiber)를 이용한 온도센서는 온도측정을 하기 힘든 좁은 곳이나 물체 내부에 광섬유를 삽입하여 온도를 측정할 수 있고, 강한 전자기장 내에서도 열원의 온도를 비접촉식으로 측정할 수 있다는 장점을 가진다[8-11]. 본 연구는 원전 2차계통에서 저온으로 냉각되어 채취되는 pH 샘플의 온도를 측정하기 위한 기초연구로서 열원에서 방출되는 적외선을 적외선 투과 광섬유를 통해 전송시켜 열원의 온도변화에 따른 광섬유 온도센서의 출력신호를 측정하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 광원은 열 방출형(filament emitter)

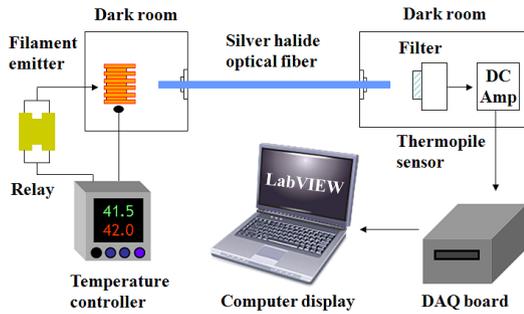
적외선 광원(IR-12K, Scitec Ltd.)으로서 방출면적(active area)은 3.5 mm × 3.5 mm이다. 방사율(emissivity)이 100%인 흑체(black body)의 온도와 파장에 따른 복사에너지의 분포를 나타낸 빈의 변위법칙(Wien's displacement law) 및 플랑크 곡선(Plank's curve)과 비교하였을 때, 연구에 사용된 열원(gray body)의 경우, 1~22 μm 영역의 적외선 파장에서 80%의 방사율을 보인다. 적외선 광원으로 사용된 열원의 온도는 인가전압에 의해 변화되고, 각각의 열원의 온도에 따라 방출되는 적외선의 파장이 결정된다.



[그림 1] 할로겐화 은 광섬유의 파장에 따른 전송률

광섬유 온도센서의 감지부 및 열원에서 방출되는 적외선의 전송경로가 되는 적외선 투과 광섬유로는 할로겐화 은 광섬유(silver halide optical fiber, PIR 900/1000, JTIIngram Co.)를 사용하였고, 자켓(jacket)을 포함한 광섬유의 외경은 1.3 mm, 코어(core)의 직경은 0.9 mm이며 클래딩(cladding)의 두께는 0.05 mm이다. 코어와 클래딩은 할로겐화 은 물질인 AgCl:AgBr 혼합물질이고, 자켓은 폴리에테르에테르케톤(polyetheretherketone, PEEK) 폴리머로 구성되어 있다. 따라서 할로겐화 은 광섬유는 불용해성, 무독성이며 유연한 성질을 갖는다[12]. 코어의 굴절률은 2.15이고 개구수(numerical aperture, NA)는 0.25이며 녹는점은 415℃이다. 그림 1은 실험에 사용된 할로겐화 은 광섬유의 파장에 따른 전송률을 보여주고 있으며 적외선 전송 파장범위는 중적외선 영역인 4~18 μm이다.

적외선 센서로는 실온에서 작동하고 적외선을 감지할 수 있는 열형 검출기(thermal detector)인 열전쌍열(thermopile, A2TPMI3340AA060, Perkin Elmer Inc)를 사용하였다. 이 열형 센서는 주위온도가 25 ± 1℃이고, 측정 물체의 방사율 및 온도가 각각 99% 이상, 60 ± 0.3℃ 일 때의 교정점(calibration point)에서 ± 1.5 K의 정확도를 가진다. 열전쌍열 내에 사용된 적외선 필터는 5.5~16 μm의 투과 파장범위를 가지는 기본 필터(standard filter)로서 7.5~13.5 μm 파장영역에서 70% 이상의 투과율을 보인다.



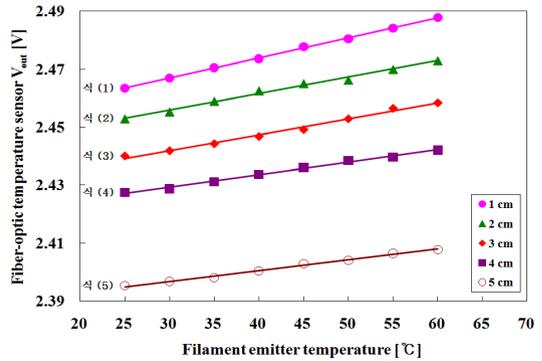
[그림 2] 할로겐화 은 광섬유를 이용한 광섬유 온도센서의 실험구성

그림 2는 할로겐화 은 광섬유를 이용한 광섬유 온도센서의 실험구성을 보여준다. 열원, 할로겐화 은 광섬유 그리고 열전쌍열을 일직선상에 위치시키고 열원과 열전쌍열 및 할로겐화 은 광섬유의 양 끝단은 주위 환경의 영향을 최소화하기 위해서 암실처리를 하였다. 할로겐화 은 광섬유를 통해 전송된 적외선은 열전쌍열 앞에 위치한 기본 필터에 의해 감지 가능한 적외선 파장영역만 투과되어 센서에 입사되고, 열전쌍열에서 적외선 신호를 전기신호로 변환하면 증폭회로는 미세한 센서의 출력전압을 증폭시키게 된다. 증폭된 최종 출력전압은 신호수집장치(DAQ board, NI USB-6259, National Instruments Co.)를 거쳐 뒤 랩뷰(LabVIEW) 프로그램을 통해 디스플레이 및 저장된다.

본 연구에서 모든 실험은 25℃ 실온에서 수행하였고, 반복 실험과 무작위 실험을 통해서 열원의 온도변화에 따른 광섬유 온도센서의 출력전압을 측정하였다. 또한 열원과 할로겐화 은 광섬유 끝단 사이의 거리 및 각도를 변화시키는 실험을 수행하였고, 온도와 적외선 출력신호 사이의 관계를 분석하였다.

3. 실험결과

그림 3은 할로겐화 은 광섬유의 끝단과 열원 사이의 거리 변화에 따른 열원의 온도와 광섬유 온도센서의 출력전압과의 관계를 보여준다. 열원과 할로겐화 은 광섬유 끝단과의 거리를 1~5 cm의 범위 내에서 변화시키면서 광섬유 온도센서의 출력전압 변화를 측정하였고, 그림에서 열원의 온도가 높아질수록 광섬유 온도센서의 출력전압이 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 할로겐화 은 광섬유의 끝단과 열원 사이의 거리가 멀어질수록 광섬유 온도센서의 출력전압이 작아지는 것을 알 수 있으며, 온도변화에 따른 출력전압의 변화율 역시 작아지는 것을 확인할 수 있다.



[그림 3] 할로겐화 은 광섬유의 끝단과 열원 사이의 거리 변화에 따른 열원의 온도와 광섬유 온도센서 출력전압과의 관계

식 (1)~(5)는 열원과 광섬유 끝단 사이의 거리 1~5 cm 각각의 위치에서 열원의 온도(x)와 광섬유 온도센서의 출력전압(y)과의 관계식 그리고 정확도를 보여준다.

$$y = 0.0007x + 2.4462, R^2 = 99.92\% \quad (1)$$

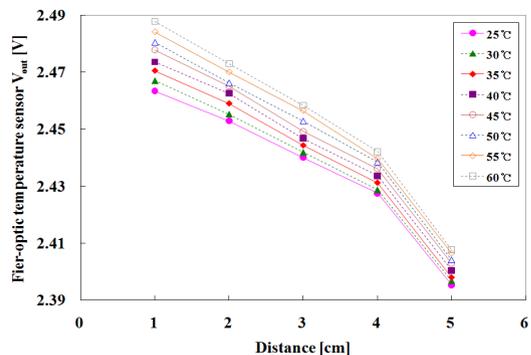
$$y = 0.0006x + 2.4385, R^2 = 99.11\% \quad (2)$$

$$y = 0.0005x + 2.4256, R^2 = 99.05\% \quad (3)$$

$$y = 0.0004x + 2.4163, R^2 = 99.42\% \quad (4)$$

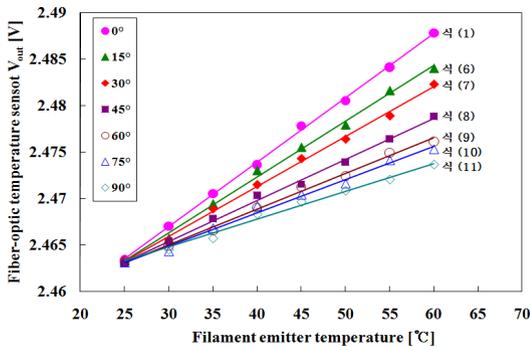
$$y = 0.0004x + 2.3857, R^2 = 99.25\% \quad (5)$$

그림 4는 할로겐화 은 광섬유의 끝단과 열원 사이의 거리 변화에 따른 온도별 광섬유 온도센서 출력전압의 변화를 나타낸다. 그림에서 열원의 온도에 상관없이 거리가 멀어질수록 광섬유 온도센서의 출력전압이 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한 거리가 멀어질수록 열원의 온도를 구별할 수 있는 광섬유 온도센서의 민감도(sensitivity)가 작아지는 것을 확인할 수 있다.



[그림 4] 할로겐화 은 광섬유의 끝단과 열원 사이의 거리 변화에 따른 온도별 광섬유 온도센서 출력전압의 변화

그림 5는 할로겐화 은 광섬유의 끝단과 열원 사이의 각도 변화에 따른 열원의 온도와 광섬유 온도센서 출력전압과의 관계를 보여준다. 할로겐화 은 광섬유와 열원 사이의 각도가 0° 일 때 광섬유와 열원은 일직선 상태이고, 각도가 90° 일 때 서로 수직인 상태를 나타낸다. 각도 변화 실험에서 열원과 광섬유 끝단 사이의 거리는 1 cm로 고정하여 실험을 진행하였다. 그림에서 할로겐화 은 광섬유의 끝단과 열원 사이의 각도가 커질수록 광섬유 온도센서의 출력전압이 작아지는 것을 알 수 있으며, 출력전압의 변화량 역시 작아지는 것을 확인할 수 있다.



[그림 5] 할로겐화 은 광섬유의 끝단과 열원 사이의 각도 변화에 따른 열원의 온도와 광섬유 온도센서 출력전압과의 관계

식 (1), (6)~(11)은 열원과 광섬유 끝단 사이의 각도 0~90° 각각의 위치에서 열원의 온도(x)와 광섬유 온도센서의 출력전압(y)과의 관계식 그리고 정확도를 보여준다.

$$y = 0.0006x + 2.4483, R^2 = 99.67\% \quad (6)$$

$$y = 0.0005x + 2.4497, R^2 = 99.63\% \quad (7)$$

$$y = 0.0004x + 2.4522, R^2 = 99.65\% \quad (8)$$

$$y = 0.0004x + 2.4535, R^2 = 99.52\% \quad (9)$$

$$y = 0.0004x + 2.4542, R^2 = 99.04\% \quad (10)$$

$$y = 0.0003x + 2.4558, R^2 = 99.05\% \quad (11)$$

실험결과, 할로겐화 은 광섬유의 끝단과 열원 사이의 거리가 줄어들수록 또한 각도가 작아져 일직선상에 있을수록 광섬유 온도센서의 출력전압이 높아지고, 출력전압의 변화량이 커지므로 열원의 온도변화에 민감하게 반응함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 유연성, 신호의 장거리 전송 능력 그리고 전

자기파에 대한 무간섭 등의 특징뿐만 아니라, 불용해성과 무독성 등의 장점을 가지는 적외선 광섬유를 이용한 비접촉식 온도센서의 개발에 관한 기초연구로서 열원으로 부터 방출된 적외선을 할로겐화 은 광섬유를 통해 전송시켜 열전쌍열로 측정하였으며, 실험에서 측정된 열원의 온도범위는 25~60℃이다.

본 연구 결과를 기초로 할로겐화 은 광섬유를 이용한 온도센서의 개발을 통해 원전 2차계통 기기 및 배관의 건전성 유지를 위해 관리되는 고온 pH의 예측을 위한 저온 pH 샘플의 온도를 정확하게 측정할 수 있을 것으로 기대된다. 앞으로의 연구방향은 광섬유를 이용한 pH 및 온도센서를 개발하여 온도변화에 따른 pH 변화를 동시에 측정하는 것이다.

참고문헌

- [1] S. N. Lvov, X. Y. Zhou, S. M. Ulyanov and A. V. Bandura, "Reference systems for assessing viability and accuracy of pH sensors in high temperature subcritical and supercritical aqueous solutions", Chem. Geol. vol. 167, pp. 105-115, 2000.
- [2] Y. Huh, J.-G. Lee, D. C. Mcphail and K. Kim, "Measurement of pH at Elevated temperatures using the optical indicator acridine", J. Solut. Chem. vol. 22, pp. 651-661, 1993.
- [3] S. N. Lvov, H. Gao, D. Kouznetsov, I. balachov and D. D. Macdonald, "Potentiometric pH measurements in high subcritical and supercritical aqueous solutions", Fluid Phase Equilib., vol. 150-151, pp. 515-523, 1998.
- [4] A. Dybko, W. Wroblewski, E. Rozniecka, J. Maciejewski and Z. Brzozka, "Comparison of thermochromic solutions for fibre optic temperature probes", Sens. Actuators, vol. 76, pp. 203-207, 1999.
- [5] J. K. Seo, W. J. Yoo, D. H. Cho, K. W. Jang, J. Y. Heo, B. Lee and Y.-K. Koh, "Characteristic analysis of a thermochromic material based fiber-optic temperature sensor for measuring temperature of subsurface water", J. Kor. Sensors Soc., vol. 18, pp. 467-474, 2009.
- [6] F. J. G. Moreda, F. J. Arregui, M. Achaerandio and I. R. Matias, "Study of indicators for the development of fluorescence based optical fiber temperature sensors", Sens. Actuators B, vol. 118, pp. 425-432, 2006.
- [7] C. Fernandez-Valdivielso, I. R. Matias and F. J.

Arregui, "Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber bragg grating and a thermochromic material", Sens. Actuators A, vol. 101, pp. 107-116, 2002

- [8] B. Lee, W. J. Yoo, D. H. Cho, K. W. Jang, S.-C. Chung and G.-R. Tack, "Low-temperature radiometric measurements using a silver halide optical fiber and infrared optical devices", Opt. Rev, vol. 14, pp. 355-357, 2007.
- [9] A. Zur and A. Katzir, "Fibers for low- temperature radiometric measurements", Appl. Opt. vol. 26, pp. 1201-1206, 1987.
- [10] W. J. Yoo, D. H. Cho, S.-C. Chung, G.-R. Tack, J. H. Jun, B. Lee, S. H. Son and S. Cho, "Feasibility study on the development of noncontact temperature sensor using infrared optical fiber", J. Kor. Sensors Soc., vol. 15, pp. 197-185, 2006.
- [11] M. Shimizu and S. Kachi, "Low-temperature radiometer using infrared fiber", Proc. SPIE, vol. MS 9, pp. 275-276, 1983.
- [12] W. J. Yoo, D. H. Cho, K. W. Jang, S. H. Shin, J. K. Seo, S.-C. Chung, B. Lee, B. G. Park, J. H. Moon, Y.-H. Cho and S. Kim, "Infrared radiation thermometer using a silver halide optical fiber for thermal ablation", Opt. Rev, vol. 16, pp. 386-390, 2009.

유 옥 재(Wook Jae Yoo) [정회원]



- 2006년 2월 : 건국대학교 의학공학부 의용전자전공 학사 (공학사)
- 2008년 2월 : 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사 (공학석사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 건국대학교 일반대학원 의학공학과 박사과정

<관심분야>
의광학, 의료영상, 의료방사선공학

이 봉 수(Bongsoo Lee) [정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 원자핵공학과 학사 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 원자핵공학과 석사 (공학석사)
- 1999년 8월 : U. of Florida 의공학 박사 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 건국대학교 의학공학부 교수

<관심분야>
의광학, 의료영상, 의료방사선공학

박 병 기(Byung Gi Park) [정회원]



- 1999년 8월 : 서울대학교 원자핵공학과 박사 (공학박사)
- 2002년 10월 ~ 2007년 2월 : (주)미래와도전 전문연구원
- 2007년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 에너지환경공학과 교수

<관심분야>
원자핵공학

유 옥 재(Wook Jae Yoo) [정회원]



- 2006년 2월 : 건국대학교 의학공학부 의용전자전공 학사 (공학사)
- 2008년 2월 : 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사 (공학석사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 건국대학교 일반대학원 의학공학과 박사과정

<관심분야>
의광학, 의료영상, 의료방사선공학

조 영 호(Young-Ho Cho) [정회원]



- 1995년 2월 : 서울대학교 원자핵공학과 학사 (공학사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 원자핵공학과 석사 (공학석사)
- 2006년 8월 : 서울대학교 원자핵공학과 박사 (공학박사)
- 2008년 9월 ~ 현재 : 대구가톨릭대학교 방사선학과 교수

<관심분야>
의료방사선공학, 원자핵공학